地震発生時における給排水設備の機能確保に関する一考察

超高層建物における地震防災対策の優先順位の検討

OBSERVATION OF THE MAINTENANCE OF POST-SEISMIC
PLUMBING SYSTEM FUNCTIONS

Investigation of seismic countermeasure priorities for high-rise buildings

大橋 一正*, 西川 豊宏**, 遠藤 透***, 藤村 竜馬****

*Kazumasa OHASHI, Toyohiro NISHIKAWA, Toru ENDO
and Tatsuma FUJIMURA*

Seismic countermeasures enabling the maintenance of high-rise plumbing system functions following an earthquake were elucidated from the perspective of business continuity planning (BCP) formulation, using the Kogakuin University high-rise building in Shinjuku as a model. Recovery curves were then used to determine the location of the post-seismic operations center and the effects of seismic countermeasures on existing plumbing systems.

- 1) Seismic countermeasure priorities can be effectively assessed by bottleneck index (B.I.) comparisons (see Note 1), with consideration given to seismic resistance, reparability and the relative importance of individual plumbing equipment and system components. Using recovery curves, it is possible to show the plumbing system recovery process.
- 2) Lower-level floor systems can be used most effectively as post-seismic operations centers, as the B.I. values of the low-floor equipment and plumbing that comprise the system functions are lower than those of the mid- and high-level floor systems.
- 3) The number of expected days, from earthquake to recovery, of lower-level floor functionality can be shortened to 2 days by implementing seismic countermeasures for break tanks, which exhibit the highest B.I. values, as shown by recovery curves exhibiting the effects of countermeasure implementation.

Keywords : *Plumbing System, Earthquake Disaster Prevention, High-rise Building,**Business Continuity Plan, Bottleneck Index, Recovery Curve*

給排水設備, 地震防災対策, 超高層建築, 事業継続計画, Bottleneck Index, 復旧曲線

1. はじめに

近年、災害に対し事業の継続や早期復旧を目的とした事業継続計画(以降 BCP)が必要とされている。なかでも、大地震発生が想定されている今日において、BCPを策定するうえで地震は優先すべき事象である。地震を対象としたBCPを策定する際、建物内部機能を担う建築設備は、地震後の早期復旧を可能とするための措置が講じられているとともに、地震直後において在館者が最低限必要とする設備機能が保守されていることが肝要で、それらを客観的かつ定量的に評価することが重要である。

これまで、建築設備の耐震設計については、いくつかの研究や調査事例に基づき、設計指針¹⁾として取りまとめられている。木内²⁾~⁴⁾は兵庫県南部地震における建築設備の被害状況を基に耐震対策について提言し、信頼性を確保するための対策や建築設備診断に関する考え方について検討している。諏訪、神田ら⁵⁾は建築設備機器・配管の形状や取り付け方法は多様であるため、建築設備の耐震性能をマクロ的に評価する必要があるとし、兵庫県南部地震で被災した

建築設備の地震被害データを基に、耐震性能を統計的観点から分析している。

これら指針や既往研究は、設備機器単体における耐震性能や地震動強さに対する概ねの被害状況を推定するものであり、BCPとして復旧期間を設定した対策を検討する場合や、対策の效果を知ることが困難である。また、複数の機器や配管が連結することによりシステムとして機能する建築設備に対し、地震発生直後から機能を復旧させるために必要な措置を検討する資料としては適用範囲が限定される。一方、設備システムを評価対象に、著者ら^{6,7)}はBCP策定に有用な情報の整備を目的に、建物に要求される内部機能をシステムとして捉え、仮想の建物を例に損傷相関を考慮したシステムの機能停止期間を評価し、設備機器・配管の地震防災対策の優先順位を示すBottleneck Index(以降 B.I.)^{注1)}と設備システムの復旧過程を示す復旧曲線を提案した。しかしながら、BCP策定の観点から在館者の安全確保と帰宅困難者の一次受け入れを優先課題に地震防災対策の效果を検討したが、機能停止期間の評価手法の提案に留まってお

* 工学院大学 名誉教授・博士(工学)

** 工学院大学建築学部まちづくり学科 准教授・博士(工学)

*** 榊塚研究所 修士(工学)

**** ㈱ジェイアール東日本建築設計事務所 修士(工学)
(当時 工学院大学大学院)

Prof. Emeritus, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Urban Design and Planning, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

Shinozuka Research Institute, M. Eng.

JR East Design Corporation, M. Eng.

り、実建物への適用は行っていない。

以上より、本研究はこれまでの研究成果^{6)~15)}を基に、実建物として工学院大学新宿校舎高層棟(以降 K 建物)の建築設備に主眼を置き、地震後の早期復旧を可能とするための具体的な対策について考察するものである。特に建築設備のなかでも地震後の避難生活における衛生環境を保全するという視点から給排水設備に着目し、設備システムの地震防災対策を検討した。

2. 建築設備の地震リスク評価とシステムのモデル化

2.1 BCP の観点からみた建築設備の地震防災対策

地震発生直後の事業継続を確かなものにするには、まず事業主体者が重要業務や地震時に求められる役割を明確にする必要がある。超高層建物は、敷地を高度に利用しているため建物の在館者密度が高く、地震後の都市基盤として期待される機能水準は高い。また、既往の研究・調査¹⁶⁾によると、これまでの地震後の避難生活における要求項目で共通して求められるものは、飲料水や生活用水、換気、暖房、照明等があり、とりわけ建物内での水の確保と衛生環境は、人命に直接関わるものであり要求水準が高い。これらを担う給排水設備システムは複数の設備機器・配管が連結しているため、地震に対するリスクを事前対策・地震対応としての視点から定量化し、対策が優先して必要となる設備機器・配管を具体的に特定することは、BCP の観点から有効である。以下に建築機能の内、上水機能に着目し評価方法及び評価システムのモデル化について示す。

2.2 Bottleneck Index と復旧曲線

設備システムを構成する設備機器・配管の個別の期待復旧日数は(1)式^{6,7)}により、各被害形態に対応する復旧日数と損傷確率の積の和として設定する。なお、損傷確率 $p_{fi}(x)$ ^{注2)}は、設備機器に作用する地震動強さ及び設備機器・配管 i の耐力値ともに対数正規分布に従うとして(2)式^{6,7,17)}により求める。

$$E(T_i) = \sum d_i \cdot p_{fi} \quad (1)$$

$$p_{fi}(x) = \int_0^{r_{mi}} \left(\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\zeta_{Ci}^2 + \zeta_{Ri}^2} \right) \cdot \exp \left\{ -\frac{(\ln x - \ln c_{mi})^2}{2(\zeta_{Ci}^2 + \zeta_{Ri}^2)} \right\} \cdot x \, dx \quad (2)$$

$E(T_i)$: 期待復旧日数, d_i : 各被害形態に対応する復旧日数,

p_{fi} : 各被害形態に対応する損傷確率,

r_{mi} : 設備機器・配管 i に作用する地震動の中央値,

ζ_{Ci} : 耐力値の対数標準偏差, ζ_{Ri} : 作用地震動の対数標準偏差,

c_{mi} : 設備機器・配管 i の作用地震動に換算した耐力の中央値

建築設備は一般的に、個別の設備機器のみにより機能確保されておらず、多数の設備機器・配管により構成されたシステムとして機能が確保されている。このことから、設備システムの機能確保については、直列のシステムモデル(以降 ライン)を用いて評価する。ライン上のいずれかの設備機器や配管等が地震等の被害により機能喪失することにより、そのラインは機能停止に陥る。また、被害を受ける設備機器・配管によっては、ライン単位で機能停止となる場合や建物全体の機能が停止する場合がある。これを影響度と称し、設備機器・配管の機能喪失が建物全体機能の内、どの程度の機能喪

失になるのかを評価する値として設定する。例えば、受水槽や受電設備等、建物全体機能に影響を与える場合には影響度は 1.0 となる。この影響度と設備機器・配管個別の期待復旧日数の積を B.I. 称し、(3)式^{6,7)}により求める。これにより設備機器・配管の脆弱性(以降 耐震性)や復旧の難易度(以降 修復性)、全体機能への影響度(以降 重要性)の 3 つの要件を加味した評価指標となり、地震防災対策の優先順位を判断する事ができる。

$$B_i = s_i \cdot E(T_i) \quad (3)$$

B_i : 設備機器・配管 $i(i=1 \sim n)$ の B.I., s_i : 影響度

次に、複数の設備機器・配管が被害を受けた際、同時復旧が行なわれる^{注3)}ものと想定すると、システムとしての復旧期間の確率関数 $F_T(t)$ は(4)式^{6,7,17)}により求める。

$$F_T(t) = P(T_1 < t, T_2 < t, \dots, T_i < t, \dots, T_n < t) \quad (4)$$

T_i : 設備機器・配管 i の期待復旧日数

この確率関数の期待値が、システムとしての期待復旧日数である。このシステムの期待復旧期間を早い順に並べ替え、縦軸に影響度の累積値として描いた図を復旧曲線と称する。なお、以下の復旧期間の評価においては、被害事象の相関係数は被災事例を含め多くのデ

図1 K建物の概略系統図

図2 評価システムモデルと影響度^{注5)}

ータを基に想定されるべきであるが、それらは今後の課題とし、既往の研究⁷⁾と同様に、0.64(建物応答のばらつきとして対数標準偏差を0.4、設備機器・配管の耐力値のばらつきとして対数標準偏差を0.3)とした。

2.3 設備システムのモデル化

図1はK建物の概略系統図、図2は地震リスク評価に必要となる評価システムモデルと影響度^{注4)}である。K建物は1989年に竣工した延床面積36,028[m²]、地上29階、地下6階の超高層建築であり、給水方式は低層、中層、高層の3系統に分割された重力式である。各系統の高置水槽は8階、20階、R階に設置されており、それぞれB2～6階、7～17階、18～28階に供給している。地震時に利用する可能性のある、地上階の機能を2～7階、9～19階、21～28階の機能として階ごとにラインを設定し、計25のラインとしてモデル化する。また、各ラインの重要度は同一として、1ラインの影響度は一律1/25とした。

本評価に用いる入力地震動¹⁹⁾を図3に示す。入力地震動は、東京湾北部地震M7.3を想定した強震動予測より得られた模擬地震波100波のうち、建屋の最大応答値が概ね上位10番目の地震波を立体フレームモデルに入力し得られた弾塑性解析結果としたものである。

図3 入力地震動¹⁹⁾

3. 評価対象建物の現状

3.1 過去の被害事例と評価対象の現状

K建物における設備機器・配管の設置状況と過去の地震被害事例との関連を確認するため、表1に設備機器・配管の被害事例と設置状況比較一覧^{2,5,20,21)}を示す。過去の地震被害事例^{注6)}をみると、水槽はスロッシングによる天板や側板パネルの損傷被害が多数報告されている。一方、躯体やコンクリート基礎にアンカボルトを用い据え付けられている機器(以降 床置き機器)は固定強度不足による移動・転倒・ズレ、配管類は接続部の破損・漏水・破断及び支持材の引抜けが報告されている。

K建物における設備機器・配管の設置状況は水槽及びその他の床置き機器はコンクリート基礎や躯体にアンカボルトを用い固定されている。配管については、ステンレス配管が用いられ、枝管には変位吸収管継手が採用されている。

3.2 被害の定義と耐力値の算出条件

K建物における設備機器・配管の設置状況と過去の地震被害事例を基に、設備機器・配管の被害を以下のように定義した。

表2に設備機器・配管での被害の定義と耐力値算出条件及び復旧日数^{1,22)}を示す。

被害は、設備機器・配管が機能停止になり補修や改修が必要になったものとした。設備機器・配管ごとにみると、水槽は側板パネルの亀裂、ポンプやキュービクル等の床置き機器はアンカボルトの破断による移動、転倒とし、配管は残留変形後の繰り返し加振によりフランジのパッキン部で漏水被害が発生するケースを被害発生と定義した。なお本報では、設備機器・配管等個々の被害^{注5)}を対象にリスク評価を行っている。

表中の復旧日数とは、設備機器・配管が被害を受けた後、復旧までに要する日数であり、被害の程度や建物・インフラの被害規模にも影響するものである。しかしながら、指針²³⁾によればインフラや施工会社等の被害状況を想定することは困難であるため、復旧日数を設定する現実的な手法として設備機器・配管の更新に要する時間を施工会社等に聴取するとされている。以上より、施工会社への聴取結果を基に復旧日数を工場加工期間と各種施工期間を合わせたものとし、水槽が17日、ポンプが25日、キュービクルが21日、配管が27日程度と設定^{注6)}した。

次に、設計指針¹⁾を基に被害の定義に即した設備機器・配管の耐力値を算出した。なお、設備機器・配管の耐力値には、各被害の定義に対応する程度のエネルギー吸収性能を考慮し設定した。水槽及び床置き機器のは、アンカボルトに生じるせん断力と引張り力による降伏震度を算出し、降伏震度を基に最大応答加速度として耐力値を設定する。アンカボルトは鋼材強度、コンクリートのコーン状破壊強度、付着強度(接着系の場合)から各強度の加速度換算耐力値を算出し、最小値を用いる必要がある。試算の結果、鋼材強度で決まる耐力値が最も小さく、アンカボルトにはせん断力と引張り力が同時に生じることから、ここでは鋼材強度から求める耐力値を(5)式¹⁾により算出する。

表1 設備機器・配管の被害事例と設置状況比較一覧^{2,5,20,21)}

機器名称		過去の地震被害事例 ^{注6)}	K建物の設置状況
水槽		・スロッシングによる天板、側板の破損 ・中仕切壁、接合部の損傷 ・配管の破損 ・アンカボルトの破損による移動、転倒	・ボルトによる本体と平架台の固定 ・アンカボルトによる平架台とコンクリート基礎の固定 ・FRP水槽耐震設計基準の旧指針で耐震設計
床置き機器	ポンプ	・固定強度不足による移動、ズレ、転倒 ・機器耐力の不足による破損	・アンカボルトによる防振架台とコンクリート基礎の固定 ・防振架台内側にコーナーストップをボルトで設置
	キュービクル	・波及被害が要因である漏水	・コンクリート基礎にアンカボルトを用いて固定
配管		・配管本体及び配管接続部の破断、変形 ・支持材の引抜け	・ステンレス配管を使用 ・枝管は変位吸収管継手を使用

表2 被害の定義と耐力値算出条件及び復旧日数^{1,22)}

機器名称	定義	復旧日数	算出条件	算出強度 [N/mm ²]
水槽	側板パネルの僅かな亀裂	17	FRPパネル水圧強度	短期許容水圧 ²²⁾ 0.04
ポンプ	アンカボルトの破断による移動、転倒	25	アンカボルトの破断点	基準強度 ¹⁾ 235
キュービクル		21		
配管	フランジパッキン部からの漏水	27	立て管の破断点	

$$1.4f_t \geq \sigma + 1.6\tau \quad (5)$$

f_t : 許容引張り応力度[N/cm²], σ : 引張り応力度[N/cm²],

τ : せん断応力度[N/cm²]

σ と τ は発生応力度であるため、応答加速度の増大とともに変動する。そこで、応答加速度を増大させ許容引張り応力度[N/cm²]に達する時の加速度を応答加速度換算耐力値とした。せん断力のみが生じる設備機器については、許容値に対する余裕率 β_E (許容値を発生応力度で除した値) を (6) 式¹⁾により設備機器個々で算出する。

$$\beta_E = f_t / \tau \quad (6)$$

β_E : 余裕率[-] (許容値を発生応力度で除した値)

f_t : 許容せん断応力度[N/cm²]

設備機器個々の余裕率 β_E を算出した後、発生応力算出時に与えた加速度を乗じることで加速度換算耐力値を算出する。

立て管は、設計荷重条件^{注7)}における荷重の組み合わせより、フロア間の配管単位で発生応力を算出する。ここでは、図3に示す入力地震動より、K建物における応答が鉄骨造における立て管の設計基準である層間変形角 1/100 を超えていないことから、加速度により慣性力として生じる応力と自重により生じる応力、内圧により生じる応力の組み合わせで(7)式¹⁾により算出する。 σ_D , σ_{PL} , σ_E については指針¹⁾を基に算出する。なお、文献²⁴⁾にて継手部の強度は配管本体の強度の 1/2 以下であることが実験にて示されていることから、ここでは基準強度 F に 1/2 を乗じている。

$$\beta_E = \left(\frac{F}{2} - \sigma_D - \sigma_{PL} \right) / \sigma_E \quad (7)$$

F : 基準強度[N/cm²]

σ_D : 自重により生じる応力度[N/cm²]

σ_{PL} : 常時内圧により生じる応力度[N/cm²]

σ_E : 応答加速度により生じる短期応力度[N/cm²]^{注8)}

水槽及び床置き機器の耐力値算出時と同様に発生応力算出時に与えた設計用水平震度を応答加速度値に変換し、配管個々の余裕率 β_E に乗じることで加速度換算耐力値を算出する。これにより、各設備機器・配管の形状や材質、施工法等を考慮した、加速度換算耐力値を得る。

図4は各設備機器・配管単体の耐力値を算出したものである。水槽類や配管類の耐力値が比較的小さく、受水槽は約 600[cm/sec²]で損傷すると予測された。キュービクル及び揚水ポンプの耐力値に大きな違いが表れたのは、設置階や機器運転重量の違いによるものである。このように設備機器・配管によって耐力値が大きく異なり、算出結果に基づく対策が必要となる。

4. B.I. と期待復旧日数の短縮

4.1 建物利用方法と系統別 B.I. の関係

図5に建物利用方法と系統別 B.I. を示す。図5の建物利用方法は平常時における K 建物の利用方法であり、主な用途は 4～11 階は教室、12～14 階は事務室、15～28 階は研究室と分けられている。図5の系統別 B.I. の分布は、前述の(1)～(7)式を用い設備機器・配管個々の B.I. を算出した後、関連する系統別に分類し降順に並び替えたものである。縦軸は B.I., 横軸は各系統の構成機器数(B.I.降順)であ

り、系統別にみると高層が 60, 中層が 52, 低層が 36 である。構成機器数に差はあるが、低層系統の機能を構成している B.I. は中層・高層系統に比べて小さいこと、地震後のエレベータ停止に伴い、階段移動を強いられることを考えると、地震後の主な活動拠点として低層系統を利用することが有効である。

図4 上水機能の加速度換算耐力値

図5 建物利用方法と系統別 B.I.

表3 上水給排水機能の B.I.

	機器名称	影響度	期待復旧日数	B.I.	系統
1	受水槽	1.00	9.27	9.27	全
2	WC 系統給水管 (21F-22F)	0.40	21.24	8.50	高層
3	揚水管 (16F-17F)	0.40	20.31	8.12	中層
4	WC 系統給水管 (8F- 9F)	0.40	18.68	7.47	中層
5	WC 系統給水管 (18F-19F)	0.40	18.55	7.42	高層
6	WC 系統給水管 (16F-17F)	0.40	18.18	7.27	中層
7	WC 系統給水管 (7F- 8F)	0.40	17.69	7.08	中層
8	WC 系統給水管 (10F-11F)	0.40	15.92	6.37	中層
9	WC 系統給水管 (9F-10F)	0.40	14.94	5.98	中層
10	揚水管 (10F-11F)	0.40	14.39	5.76	中層
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
56	WC 系統給水管 (7F- 8F)	0.20	9.64	1.93	低層
57	揚水管 (17F-18F)	0.40	4.78	1.91	高層
58	揚水管 (18F-19F)	0.40	4.67	1.87	高層
59	WC 系統給水管 (B2F-B1F)	0.20	8.89	1.78	低層
60	WC 系統給水管 (B1F- 1F)	0.20	8.86	1.77	低層
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
142	揚水ポンプ	0.40	8.5×10^{-5}	8.6×10^{-7}	中層

4.2 地震防災対策による期待復旧日数の短縮

上水給排水機能の早期復旧を目的に、B.I.の評価結果から選定した設備機器・配管に対し、地震防災対策を検討する。表3は上水給排水機能のB.I.を降順に示したものである。受水槽のB.I.が9.27であり地震防災対策の優先順位が最も高く、次いで給水管類の順位が高いことがわかる。一方、排水管類はB.I.の上位項目に挙げられないことから、本評価結果によると地震防災対策の必要性は低いことが確認できた。

ここではB.I.の最上位項目かつ地震後の活動拠点として低層系統が有効であることから、表4に示すように受水槽に対する地震防災対策を検討優先順位が高いと考える。受水槽に対し既往研究、調査事例を参考に、B.I.の構成要素である耐震性、修復性、重要性についての対策を行うとして対策の効果を算定した。耐震性についてはパネル水圧強度を向上すべくパネル強度0.04[N/mm²]から0.05[N/mm²]のパネルに交換、修復性については関連企業との応急救援体制^{注9)}を構築することにより復旧日数を17日から7日に短縮、重要性については中仕切りを設けることで機能停止範囲を縮小とした。

表5にそれぞれについての対策効果^{注10)}を示す。対策前のB.I.値9.27と比較すると耐震性についての対策後は2.85、修復性についての対策後は3.82、重要性についての対策後は、中・高層が3.71、低層が1.85であり、受水槽は重要性についての対策が有効と評価できる。

図6は受水槽への対策前後の復旧曲線^{注11)}である。上水全体機能が復旧した状態を復旧率100[%]としているが、この段階でみると対策前の期待復旧日数は25日で、対策後は耐震性、修復性ともほぼ同じで約25日となる。一方、地震後の主な活動拠点として有効と判断した低層系統の設備機能復旧を示す復旧率20[%]では、対策前の期待復旧日数約20日が対策後(耐震性)で約18日、対策後(修復性)で約19日となる。上水全体機能の復旧を考えると受水槽への対策のみでは復旧曲線の大きな変化はみられないが、受水槽への対策に加えB.I.の上位項目に対策を講ずることで、早期の復旧が可能となる。

5. まとめ

本研究は超高層建築である工学院大学新宿校舎高層棟の給排水設備を対象に、BCP策定の観点から地震発生時における機能確保・早期復旧を可能とするための耐震対策を明確にするとともに、実在する給排水設備システムにおける地震後の活動拠点と耐震対策の効果について考察した。

- 1) Bottleneck Index(B.I.)の大小比較を行うことで、設備機器・配管個々の耐震性、修復性、重要性を加味した地震防災対策の優先順位を評価することが可能となる。また、復旧曲線を用いることで、給排水設備システムの復旧過程を示すことが可能となる。
- 2) 低層系統の機能を構成している設備機器・配管のB.I.が中層・高層系統に比べ小さいことから、地震後の活動拠点として低層系統を利用することが有効である。
- 3) B.I.が最も大きい受水槽に対し耐震対策を実施した場合の効果を復旧曲線で確認すると、低層系統機能の期待復旧日数は2日短縮することが可能となる。

表4 受水槽における地震防災対策内容

	対策	対策前	対策後
耐震性 (損傷確率[%])	・受水槽のパネル水圧強度の向上 パネル水圧強度0.04[N/mm ²]から0.05[N/mm ²] のパネルに交換	54.5	16.8
修復性 (復旧日数[日])	・復旧日数の短縮 既往研究、調査事例より17日と設定したが、ヒアリング及び実態調査より関連機関との応急救援体制の構築により7日に短縮	17	7
重要性 (影響度[-])	・機能停止範囲の縮小 受水槽に中仕切りを設け分割することで、機能停止範囲を系統単位に縮小	1.00	高層 0.4 中層 0.4 低層 0.2

表5 受水槽に対する地震防災対策の効果^{注10)}

	B.I.	対策前後のB.I.比率[%]
対策前	9.27	
耐震性	2.85	
修復性	3.82	
重要性	高層 3.71 中層 3.71 低層 1.85

図6 地震防災対策前後の復旧曲線^{注11)}

本論では主に給排水設備に主眼を置き、地震リスク評価を行ったが、建物全体の復旧を考える際には、日常から外部機関との連携をはかり、建物利用計画や建物構造躯体、非構造部材を含めた被害状況の把握等、多くの検討課題がある。

謝辞

本研究では、地震動評価及び地震応答解析においては工学院大学の久田嘉章教授、山下哲郎准教授に、評価システムモデル作成においては(有)タナカ建築設備の田中孝氏にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。また、本論文は工学院大学 大橋研究室 当時卒論生 稲垣舞(現 清水建設 株式会社)、志津えりか(現 工学院大学 大学院)、田中悠紀人(現 株式会社 テクノ菱和)らの協力を頂きました。

注

- 注1) Bottleneck Index(B.I.)とは設備機器・配管の脆弱性や復旧の難易度、全体機能への影響度の3つの要件を加味した指標であり、大小比較により地震防災対策の優先順位を判断する。
- 注2) 設備機器・配管は耐力値に問題がなくとも機器内部の不具合等により機能損傷に陥る恐れがあるが、本論では地震力により生じる転倒や破断等外部からの目視により確認可能な被害を対象に評価を行っている。
- 注3) 受水槽やポンプなど各部位の復旧日数は独立した数値ではなく相互関係を有しているが、文献¹⁸⁾における同時復旧の原則を採用し、復旧工事は同時に進められ完工するものとした。なお、現地への輸送期間は考慮していない。
- 注4) 図中の英字L, M, Hはそれぞれ低層, 中層, 高層系統を示す。

注 5) 本来接続部等の損傷は、設備機器・配管相互の位置関係や配管方法の違いにより地震時の挙動は大きく変わるため、これらを考慮して分析することが最良であるが、地震時挙動を明確にするには実際の固定状況を模した加振実験や詳細なシミュレーション等から固有の値として設定する必要があるため今後の課題とした。

注 6) 施工法や材質、支持方法、建物構造の違い等、詳細に分析することが最良であるが、それらを統計的に十分分析した調査・研究例が入手できないことから、本報では設備機器・配管ごとに分類した。

注 7) 地震時、立て管に生じる応力は自重による応力、内圧力による応力、建物の層間変位による応力、加速度により慣性力として生じる応力を組み合わせたものである。

注 8) フランジ接合されている配管の継手効率には 0.6 (80 φ 以上では 0.4) を考慮している。

注 9) 平常時から関連企業とのメンテナンス契約等を結び、地震被災後において速やかに復旧作業を進める。

注 10) 本報では個別の対策による効果を確認したが、表 4 で挙げた 3 種の対策を同時に実施した場合や複数の耐震対策を実施した場合は B.I. は 0 に近づく。

注 11) 対策後(重要性)の期待復旧日数が対策前と比較して変化がみられないのは、重要性の対策として想定した水槽内に中仕切り設置に伴う耐震性能等の変化を評価モデル上、考慮していないためである。また、耐震性、修復性、重要性は独立ではなく、相互に影響を与えるものであることを考えた評価は今後の課題としている。

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会：建築設備の耐震設計 施工法，空気調和・衛生工学会，1997
- 2) 木内俊明：阪神大震災設備被害の教訓と耐震性対策への考察，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1369-1372，1995. 10
- 3) 木内俊明：建築設備耐震対策における機能性能に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)D-2，pp.963-964，1996. 9
- 4) 木内俊明：建築設備耐震診断に関する考察，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1161-1164，1997. 8
- 5) 諏訪仁，神田順：兵庫県南部地震の地震被害データをを用いた建築設備の被害率曲線，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 633 号，pp.1935-1941，2008. 11
- 6) 中村孝明，遠藤透：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，日本建築学会総合論文誌，No.7，pp.87-92，2009. 1
- 7) 遠藤透，中村孝明，大橋一正，萩原啓太：被害相関を考慮した建築設備の地震時復旧曲線の評価，日本建築学会技術報告集，第 14 巻，第 28 号，pp.503-508，2008. 10
- 8) 田中孝，大橋一正，村田博道，萩原啓太，西川豊宏，鈴木仁治：首都圏にある超高層キャンパスの地震防災に関する研究(その 5)，既往の研究と大地震による建築設備の被害状況の調査，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)B-2，pp.621-622，2007. 8
- 9) 遠藤透，中村孝明，萩原啓太，西川豊宏，大橋一正，田中孝：地震時 BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)D-2，pp.1183-1184，2008. 9
- 10) 西川豊宏，大橋一正，萩原啓太，遠藤透，中村孝明，田中孝：地震時 BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 2)，建築設備機能のモデル化，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)D-2，pp.1185-1186，2008. 9
- 11) 萩原啓太，大橋一正，遠藤透，中村孝明，田中孝，西川豊宏：地震時 BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 3)，評価指標の適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)D-2，pp.1187-1188，2008. 9
- 12) 藤村竜馬，大橋一正，西川豊宏，遠藤透，田中孝，萩原啓太：地震時 BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 4)，建築設備における被害形態の設定，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)D-2，pp.1259-1260，2009. 8
- 13) 萩原啓太，大橋一正，西川豊宏，遠藤透，田中孝，藤村竜馬：地震時 BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 5)，建物利用を考慮した補強優先順位の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)D-2，pp.1261-1262，2009. 8
- 14) 千葉広之，大橋一正，西川豊宏，田中孝，谷川原亮，藤村竜馬：地震時

- BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 6)，地震時の建物利用計画に基づく地震防災対策，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)D-2，pp.1233-1234，2010. 9
- 15) 藤村竜馬，大橋一正，西川豊宏，田中孝，谷川原亮，千葉広之：地震時 BCP に資する建築設備機能の評価とマネジメント(その 7)，避難所生活における水利用計画の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)D-2，pp.1235-1236，2010. 9
 - 16) 柏原士郎，上野淳 ほか 1 名：阪神・淡路大震災における避難所の研究，大阪大学出版会，1998
 - 17) 室津義定，米沢政昭 ほか：システム信頼性工学，共立出版，1996. 4
 - 18) 中村孝明，宇賀田健：地震リスクマネジメント，技報堂出版，2009. 1
 - 19) 島村賢太，山下哲郎 ほか 3 名：首都圏に建つ超高層キャンパスの地震応答と制震補強に関する研究(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)B-2，pp.475-476，2009. 8
 - 20) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-7 建築設備・建築環境，日本建築学会，1999
 - 21) 日本建築学会：2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震災害調査報告，日本建築学会，2006
 - 22) 株式会社 グリヂストン パネル水槽強度計算書
 - 23) 国土交通省：業務継続のための官庁施設の機能確保に関する指針
 - 24) 亀井浅道：ガス配管ネジ継手部の曲げ強度，消防研究所報告，第 55 号，1983. 3

(2011 年 3 月 30 日原稿受理，2011 年 6 月 13 日採用決定)